

DOI: 10.5846/stxb202110273022

王永珍,冯怡琳,林永一,赵文智,陈生云,邓艳芳,刘继亮.长期围封对疏勒河源区高寒草甸地表节肢动物多样性的影响.生态学报,2022,42(18): 7495-7506.

Wang Y Z, Feng Y L, Lin Y Y, Zhao W Z, Chen S Y, Deng Y F, Liu J L. Effect of long-term enclosure on ground arthropod diversity of alpine meadow in the Shule River headwaters. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7495-7506.

长期围封对疏勒河源区高寒草甸地表节肢动物多样性的影响

王永珍^{1,2}, 冯怡琳³, 林永一^{1,2}, 赵文智^{1,2}, 陈生云^{1,2}, 邓艳芳⁴, 刘继亮^{1,2,*}

1 中国科学院大学,北京 100049

2 中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州 730000

3 宁夏大学,银川 750021

4 祁连山国家公园国家长期科研基地,西宁 810000

摘要:围封会促进退化高寒草甸植被和土壤环境恢复,长期围封也会导致生物多样性及其功能下降,影响高寒草甸生态系统的稳定,但这种影响会随着季节和生境条件变化而异。为了探究不同退化程度高寒草甸地表节肢动物群落变化对围封禁牧的响应,利用陷阱法调查了疏勒河源区沼泽化草甸、草甸和草原化草甸 3 种不同退化梯度高寒草甸围封禁牧和自由放牧处理下地表节肢动物群落结构变化。结果表明:围封禁牧对高寒草甸地表节肢动物群落组成及多样性的影响随生境条件不同而异。禁牧降低了沼泽化草甸地表节肢动物的物种丰富度,而提高了草甸和草原化草甸地表节肢动物的物种丰富度;围封禁牧对沼泽化草甸地表节肢动物群落结构影响较小,显著降低了草甸生境地表节肢动物活动密度、提高了地表节肢动物多样性和均匀度,相反,禁牧显著提高了草原化草甸生境地表节肢动物活动密度、降低其多样性和均匀度;豹蛛属 1 种是高寒草甸主要的地表节肢动物类群(相对多度为 67.0%),高寒草甸土壤水分有效性等生境条件不同影响了豹蛛属 1 种对围封禁牧的响应模式,进而影响了地表节肢动物群落结构变化。总之,高寒草甸退化程度影响了地表节肢动物多样性对禁牧和放牧的响应模式,沼泽化草甸适度放牧有利于提高地表节肢动物多样性及其功能。

关键词:疏勒河源区;高寒草甸;围封禁牧;自由放牧;地表节肢动物

Effect of long-term enclosure on ground arthropod diversity of alpine meadow in the Shule River headwaters

WANG Yongzhen^{1,2}, FENG Yilin³, LIN Yongyi^{1,2}, ZHAO Wenzhi^{1,2}, CHEN Shengyun^{1,2}, DENG Yanfang⁴, LIU Jiliang^{1,2,*}

1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3 Ningxia University, Yinchuan 750021, China

4 Long-term National Scientific Research Base of the Qilian Mountain National Park, Xining 810000, China

Abstract: Enclosure will promote the restoration of degraded alpine meadow vegetation and soil environment. The Long-term enclosure will also lead to the decline of biodiversity and its function, affecting the stability of alpine meadow ecosystem, but this effect will vary with the change of season and habitat conditions. In order to explore the responses of ground

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2019YFC0507402);青海省政府采购项目(QHTX-2021\011-5);国家自然科学基金项目(41771290)

收稿日期:2021-10-27; **采用日期:**2022-08-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liujl707@lzb.ac.cn

arthropod community changes in the alpine meadows with different degradation degrees by enclosure treatments, this paper investigated the changes in composition and structure of ground arthropod community under enclosure and free grazing treatments in the alpine marsh meadow, alpine meadow and alpine steppe meadow in Shule River headwaters by pitfall trapping. The results are as follows. Forbidding grazing will affect the composition and diversity of ground arthropod community of the alpine meadow which varies with the habitat conditions of the alpine meadow. Forbidding grazing reduced the species richness of ground arthropods in the alpine marsh meadow, but increased it in the alpine meadow and steppe meadow. Enclosure had little effect on the community structure of ground arthropods in the alpine marsh meadow, while significantly reduced the activity density of ground arthropods in the alpine meadow habitats, and improved the diversity and evenness of ground arthropods. On the contrary, enclosure significantly increased the activity density of ground arthropods in the alpine steppe meadow, and reduced their diversity and evenness. *Pardosa* sp. was the main ground arthropod species in alpine meadow (67.0%). Different habitat conditions such as soil water availability in the alpine meadow affected the response of *Pardosa* sp. to forbidding grazing, thereby affecting the change of ground arthropod community structure. In conclusion, the degradation of the alpine meadow affected the response of ground arthropod diversity to enclosure and grazing treatments. Moderate grazing in the alpine marsh meadow was beneficial to improve the diversity and function of ground arthropods in alpine meadow ecosystem.

Key Words: Shule River headwaters; alpine meadow; enclosed treatment; grazing treatment; ground arthropods

祁连山是青藏高原东北部重要的生态安全屏障,也是我国冰川与水源涵养重点生态功能区,祁连山西段的疏勒河源区是我国河西走廊三大内陆河之一,也是高寒草地的重要分布区^[1],受气候、地形、水文等因素的影响,疏勒河源区独特的自然地理环境孕育了许多珍稀的动植物资源。气候变化和放牧扰动强烈影响高寒草甸生态系统多年冻土和季节性冻土的稳定,高寒草甸退化严重威胁其生态服务功能^[2-3]。近年来,疏勒河源区已经陆续开展水文、气象、植被及土壤环境的系统监测,解析了冻土和植被退化过程中植被和土壤要素变化,确定了气候变暖引起的冻土退化导致土壤微生物多样性下降,这会影响高寒草甸土壤食物网结构及其功能,加深了对土壤冻融过程与草地退化过程中生物多样性及其生态功能变化的认识^[1,4-6]。疏勒河源区冻土分布及退化也引起高寒草地植被群落变化,而过度放牧会加剧高寒草地退化,甚至会引起土壤退化^[1]。前期研究已经发现,疏勒河源区高寒草地不同类群土壤动物群落组成不同,这也表明土壤动物对高寒草地退化的响应十分敏感,但对高寒草地退化及恢复过程中土壤动物多样性及其功能转变的规律认识还很有限^[7-8]。因而,急需开展疏勒河源区高寒草甸退化过程中土壤动物多样性对放牧干扰的响应研究,为该区草地放牧科学管理提供科学依据。

高寒草甸土壤动物多样性较低,蛛形纲和昆虫纲等地表节肢动物是土壤动物群落中的关键类群,它们对气候变暖和过度放牧引起的高寒草甸退化过程中植被和土壤环境变化响应十分敏感,其多样性及其生态功能变化可以用于指示和评估高寒草甸生态系统变化^[9-12]。线虫等小型土壤动物对放牧及围封禁牧的响应存在明显的地域差异,藏北高原高寒草甸研究确定短期围封禁牧对线虫群落影响较小,适度放牧通过根系的数量和质量会增加微小食物网的复杂性^[13-14]。马金豪和吴鹏飞^[15]研究了高寒草地沙化对土壤动物的影响,确定土壤线虫对退化草地生态恢复措施的响应比土壤节肢动物更敏感。武崎等^[16]研究了四川省西北部高寒草地土壤动物对放牧的响应,发现轻度放牧草甸线虫增加,中度放牧草甸土壤节肢动物增加,而重度放牧草甸地表节肢动物增加。地表、土栖大型和小型土壤动物类群对放牧强度驱动的高寒草地退化程度响应不同,它们之间的互馈作用会影响高寒草甸地上生态系统稳定^[16-17]。围封禁牧可以恢复退化高寒草甸植被和土壤环境,土壤微生物及小型土壤动物在围封禁牧过程中也会随着高寒草甸生境变化而变,适度放牧有利于维持土壤生物多样性和土壤多功能性^[14,18]。然而,长期围封禁牧对地表节肢动物多样性的影响的认识还很有限,还不清楚适度放牧是否有利于维持地表节肢动物多样性及其功能。鉴于此,本以疏勒河源区不同退化梯度高寒草地

为研究对象,通过长期围封禁牧和自由放牧高寒草甸地表节肢动物群落对比研究,确定长期围封禁牧对高寒草甸地表节肢动物多样性的影响,为高寒草甸放牧管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

疏勒河源区位于青海省海西藏族自治州天峻县苏里乡境内,该区属于祁连山国家公园西端多年冻土和季节性冻土区,海拔高度在 3800—4100 m 之间。该区气候干旱,年降水量为 321.6 mm,降水主要集中在 5—9 月,这 5 个月降水量占全年降水量的 88.5%。年均气温为 -4.5°C ,月最高温 6.5°C 出现在 8 月,月最低气温 17.8°C 出现在 1 月。前期研究已经发现疏勒河源区高寒草甸植被盖度在 16.3%—88.7% 之间,莎草科青苔草(*Carex moorcroftii*)、小苔草(*C. parva*)、高山蒿草(*Kobresia pygmaea*)、线叶蒿草(*K. capillifolia*)和藏蒿草(*K. tibetica*)和禾本科紫花针茅(*Stipa purpurea*)等是该区主要的植物种,微地形及放牧强度改变高寒草甸植被盖度及草本多样性变化^[19]。藏野驴(*Equus kiang*)、藏狐(*Vulpes ferrilata*)、赤狐(*V. vulpes*)、普通鵟(*Buteo buteo*)、秃鹫(*Aegypius monachus*)、纵纹腹小鸮(*Athene noctua*)、棕颈雪雀(*Pyrgilauda ruficollis*)、旱獭(*Marmota bobak*)和鼠兔(*Ochtona* spp.)等是该区常见的脊椎动物。家养食草动物主要有牦牛,牲畜养殖主要以自由放牧为主。高寒草甸土壤类型为栗钙土,低洼处沼泽化草甸土壤发育为潜育土,高寒草甸退化区土壤沙化现象明显^[1]。

1.2 试验设计及样品采集

高寒草甸冻土退化引起沼泽化草甸向草甸和草原演替,本文利用空间梯度代替时间序列的方法在疏勒河源区选取沼泽化草甸(AMM)、草甸(AM)和草原化草甸(ASM)3 种典型的高寒草甸类型构成高寒草甸冻土退化过程中植被演替梯度^[20]。利用围栏建立沼泽化草甸、草甸和草原化草甸 3 个高寒草甸围封禁牧区(围封时间为 10 a),每个围封禁牧区的范围在 90000—100000 m^2 之间。同时,在每种高寒草甸禁牧处理区附近选取自由放牧的区域作为对比,确定长期围封禁牧对疏勒河源区高寒草甸地表节肢动物多样性的影响。每个围封禁牧和自由放牧区分别选择 10 个 10 m \times 10 m 的区域作为地表节肢动物样品采集区,每个地表节肢动物样品采集区布设一个陷阱收集器。2021 年 7—8 月在每种高寒草甸生境的禁牧和放牧处理小区利用改进陷阱收集器收集地表节肢动物。陷阱收集器利用矿泉水瓶制作,将旧矿泉水瓶上部剪掉倒扣放入下部分内,缩小陷阱上口面积可以有效阻止地表节肢动物样品溢出和大型食草动物踩踏破坏陷阱。陷阱保存液使用巴氏诱液(醋、糖、酒精和水的重量比为 2:1:1:20),陷阱收集器样品采集时间为 15 d。采集地表节肢动物样品带回室内利用浮选去除土壤、鼠兔粪便和枯落物,收集的节肢动物样品保存在装有 75% 的酒精溶液的采样瓶中。收集的地表节肢动物样品参照相关分类资料鉴定至种,其中部分类群幼虫和稀有类群鉴定至科;高寒草甸地表节肢动物群落中单科单属或种的类群较多,按照形态种统计数量^[21—24]。

1.3 数据处理

首先计算沼泽化草甸、草甸和草原化草甸 3 种草甸生境围封禁牧和自由放牧处理下地表节肢动物类群丰富度的稀度曲线(估计值,基于采样数量)和 Chao-1 指数,统计分析使用 Past 4.01 软件包。按照陷阱收集器统计沼泽化草甸、草甸和草原化草甸围封生境禁牧和处理下地表节肢动物活动密度(每个收集器捕获动物的个体数量)和物种丰富度(每个收集器采集的动物物种数),计算 Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度指数,统计分析使用 Past 4.01 软件包。采用二因素方差分析(GLM 模型)比较高寒草甸类型和禁牧和放牧处理对地表节肢动物群落结构(活动密度、物种丰富度、多样性指数和均匀度指数)、稀有种活动密度及物种丰富度和主要地表节肢动物种活动密度的影响,然后使用 *t* 检验比较 3 种高寒草甸禁牧和放牧处理下的差异,统计分析使用 SPSS 21.0 软件包。

利用非度量多维尺度(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)和多元方差(Permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA)分析 3 种高寒草甸禁牧和放牧处理下地表节肢动物群落组成差异,然后利

用相似性百分比(Similarity percentage analysis, SIMPER)分析确定 3 种高寒草甸生境禁牧和放牧处理下地表节肢动物群落的平均相异性和主要地表节肢动物种的贡献率,统计分析使用 Past 4.01 软件包。NMDS 排序结果采用胁强系数(Stress)衡量排序分析结果的优劣,其中 $\text{Stress} < 0.01$, 完全可信; $0.01 < \text{Stress} < 0.05$, 可信的; $0.05 < \text{Stress} < 0.1$, 基本可信; $0.1 < \text{Stress} < 0.2$, 部分信息不可信; $0.2 < \text{Stress} < 0.3$, 不可信^[25]。利用 Spearman 相关分析高寒草甸禁牧和放牧处理下土壤水分与地表节肢动物群落结构及豹蛛属 1 种活动密度的相关性,在此基础上分析 2 种生境豹蛛属 1 种与稀有地表节肢动物活动密度及物种丰富度和主要地表节肢动物种间关系变化,统计分析使用 SPSS 21.0 软件包。

2 结果与分析

2.1 高寒草甸地表节肢动物群落组成及数量变化

沼泽化草甸、草甸和草原化草甸 3 种生境共捕获 3797 头 39 种地表节肢动物,豹蛛属 1 种是优势地表节肢动物种(相对多度为 67.0%);锥须步甲属种 1、大蚊科幼虫、盲蛛 1 种、微蛛亚科 1 种、小长蝽、蝽科 1 种、蜉金龟种 1 和心步甲是常见的地表节肢动物种,其相对多度介于 1%—10%之间;稀有类群 30 种,它们的个体数量占总捕获数的 7.4%。沼泽化草甸共捕获 1292 头 21 种地表节肢动物,禁牧与放牧处理相比降低了地表节肢动物种类(11 种和 16 种)和数量(581 头和 711 头),沼泽化草甸禁牧处理降低了豹蛛属 1 种、行步甲属 1 种、葬甲科 1 种和大蚊科幼虫的捕获数量,而禁牧处理提高了蟹蛛科 1 种的捕获数量增加(表 1)。草甸共捕获 1175 头 27 种地表节肢动物,禁牧与放牧处理相比降低了地表节肢动物种类(18 种和 24 种)和数量(264 头和 911 头),禁牧处理降低了草甸生境豹蛛属 1 种、蜉金龟种 1 和大蚊科幼虫的捕获数量,而提高了草甸生境盲蛛 1 种、暗步甲 1 种、锥须步甲属种 1 和心步甲的捕获数量(表 1)。草原化草甸共捕获 1330 头 32 种地表节肢动物,禁牧与放牧处理相比提高了地表节肢动物种类(28 种和 23 种)和数量(785 头和 545 头),禁牧处理降低了草原化草甸生境微蛛亚科 1 种、蝽科 1 种、小长蝽和锥须步甲属种 1 的捕获数量,但提高了草原化草甸生境盲蛛 1 种、豹蛛属种 1 和大蚊科幼虫的捕获数量(表 1)。

2.2 围封禁牧对高寒草甸地表节肢动物群落结构的影响

沼泽化草甸、草甸和草原化草甸 3 种生境禁牧和放牧处理下地表节肢动物物种稀度曲线估算结果表明,禁牧处理降低了沼泽化草甸地表节肢动物物种丰富度,沼泽化草甸生境禁牧处理下地表节肢动物 Chao-1 指数低于放牧处理(12.0 和 21.0);草甸生境禁牧处理提高地表节肢动物物种丰富度,草甸禁牧处理地表节肢动物 Chao-1 指数高于放牧处理(25.5 和 24.3);草原化草甸生境禁牧处理地表节肢动物物种丰富度略高于放牧处理,草原化草甸禁牧处理地表节肢动物 Chao-1 指数高于放牧处理(31.5 和 24.2)(图 1)。此外,研究还发现沼泽化草甸地表节肢动物物种丰富度低于草甸和草原化草甸生境。

高寒草甸生境类型和禁牧和放牧处理对地表节肢动物群落影响的 PERMANOVA 多元方差分析结果表明,高寒草甸生境类型和禁牧和放牧处理均对地表节肢动物群落组成有显著影响($F = 16.28, P < 0.001$; $F = 5.78, P = 0.002$),生境类型和处理对地表节肢动物群落组成还存在显著的交互影响($F = 13.50, P < 0.001$)。沼泽化草甸禁牧和放牧处理下地表节肢动物群落组成相差较小($F = 1.91, P = 0.130$),禁牧和放牧处理下地表节肢动物群落组成存在一定差异(图 2)。SIMPER 分析结果表明,沼泽化草甸生境禁牧和放牧处理地表节肢动物群落的平均相异性为 38.8%,豹蛛属 1 种和大蚊科幼虫解释了 2 种处理地表节肢动物群落差异的 84.8%,草甸生境禁牧和放牧处理地表节肢动物群落组成存在显著差异($F = 21.20, P < 0.001$),禁牧和放牧处理地表节肢动物群落组成明显不同;草甸生境禁牧和放牧处理地表节肢动物群落的平均相异性为 79.3%,豹蛛属 1 种、大蚊科幼虫和蜉金龟 1 种解释了 2 种处理地表节肢动物群落差异的 78.6%;草原化草甸生境禁牧和放牧处理地表节肢动物群落组成也存在显著差异($F = 7.17, P < 0.001$),禁牧和放牧处理地表节肢动物群落组成明显不同,草原化草甸生境禁牧和放牧生境地地表节肢动物群落的平均相异性为 46.8%,豹蛛属 1 种、锥须步甲属种 1、盲蛛 1 种和小长蝽解释了 2 种处理地表节肢动物群落差异的 69.7%(图 2)。

表 1 沼泽化草甸、草甸和草原化草甸禁牧和放牧处理下地表节肢动物个体数统计

Table 1 Number of individuals in ground arthropods collected at enclosed and grazing treatments of the alpine marsh meadow(AMM), alpine meadow(AM) and alpine steppe meadow(ASM)

地表节肢动物 Ground arthropods	AMM		AM		ASM	
	ET	GT	ET	GT	ET	GT
盲蛛 1 种 <i>Opiliones</i> sp.	0	0	35	0	59	32
豹蛛属 1 种 <i>Pardosa</i> sp.	542	629	101	651	450	172
蟹蛛科 1 种 <i>Thomisidae</i> sp.	10	2	0	0	3	0
微蛛亚科 1 种 <i>Erigoninae</i> sp.	0	0	15	18	15	39
皿蛛科 1 种 <i>Linyphiidae</i> sp.	0	5	1	7	0	0
蟠科 1 种 <i>Pentatomidae</i> sp.	0	1	0	2	6	31
小长蝽 <i>Nysius ericae</i>	0	0	11	0	20	44
大青叶蝉 <i>Cicadella viridis</i>	5	2	0	0	1	9
蚜科 1 种 <i>Aphididae</i> sp.	0	0	0	0	0	2
暗步甲 <i>Amara</i> sp.	0	0	14	4	4	0
暗步甲 <i>Amara micans</i>	0	0	1	2	0	0
杂色锥须步甲 <i>Bembidion varium</i>	0	0	0	1	0	1
锥须步甲属种 1 <i>Bembidion</i> sp.1	3	1	25	7	146	158
锥须步甲属种 2 <i>Bembidion</i> sp.2	0	1	0	0	0	0
行步甲属 <i>Trechus</i> sp.	0	7	0	0	5	5
铠步甲 <i>Loricera obsoleta</i>	0	0	1	0	1	0
心步甲 <i>Nebria orientalis</i>	0	0	36	4	2	1
圆胸隐翅虫属 <i>Tachinus</i> sp.	3	6	0	0	3	4
离鞘隐翅虫属 <i>Platystethus</i> sp.	0	5	1	2	2	2
前角隐翅虫属 <i>Aleochara</i> sp.	0	0	3	3	0	3
隐翅虫科 1 种 <i>Staphylinidae</i> sp.	0	0	0	0	7	0
隐翅虫科幼虫 <i>Staphylinidae</i> spp. larve	0	0	4	2	4	3
纵条瓢虫 <i>Coccinella longifasciata</i>	4	0	0	0	1	0
瓢甲科幼虫 <i>Coccinellidae</i> sp. larve	0	3	0	0	2	2
叶甲科 1 种 <i>Chrysomelidae</i> sp.1	0	0	1	2	8	8
叶甲科 2 种 <i>Chrysomelidae</i> sp.2	0	0	2	2	14	13
叶甲科 3 种 <i>Chrysomelidae</i> sp.3	3	0	0	2	0	0
叶甲科幼虫 <i>Chrysomelidae</i> sp. larve	0	1	0	0	0	0
梨象属 1 种 <i>Apion</i> sp.	0	1	0	0	1	0
象甲科 1 种 <i>Curculionidae</i> sp.	0	0	0	1	0	1
长泥甲科 1 种 <i>Heteroceridae</i> sp.	0	0	0	6	0	0
科小琵甲 <i>Gnaptorina kozlovi</i>	0	0	8	1	1	0
蜉金龟种 1 <i>Aphodius</i> sp.1	3	0	0	49	9	2
蜉金龟种 2 <i>Aphodius</i> sp.2	0	0	1	4	1	0
水龟甲科 1 种 <i>Hydrophilidae</i> sp.	0	1	0	2	2	0
球蕈甲科 1 种 <i>Leiodidae</i> sp.	1	0	4	4	2	7
葬甲科 1 种 <i>Silphidae</i> sp.	0	9	0	0	0	0
夜蛾科幼虫 1 种 <i>Noctuidae</i> sp. larve	1	0	0	2	1	1
大蚊科幼虫 <i>Tipulidae</i> spp. larve	6	37	0	133	15	5

ET:禁牧处理 Enclosed treatments;GT:放牧处理 Grazing treatments

高寒草甸生境类型和处理对地表节肢动物群落结构参数的二因素方差分析结果表明,禁牧处理显著影响地表节肢动物活动密度,它还随着高寒草甸生境类型不同存在显著变化;高寒草甸生境类型和处理对地表节肢动物物种丰富度的影响较小(表 2)。3 种高寒草甸生境地表节肢动物活动密度相差较小,草甸生境禁牧处

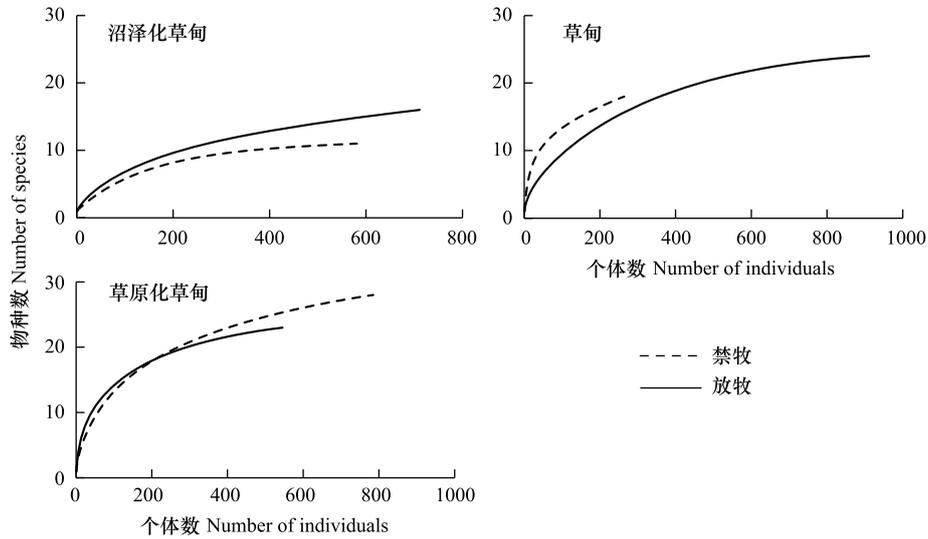


图 1 疏勒河源区沼泽化草甸、草甸和草原化草甸禁牧和放牧处理地表节肢动物物种丰富度稀度估计曲线

Fig.1 Estimated species richness of ground arthropods based on rarefaction methods in enclosed and grazing treatments of the alpine marsh meadow (AMM), alpine meadow (AM) and alpine steppe meadow (ASM)

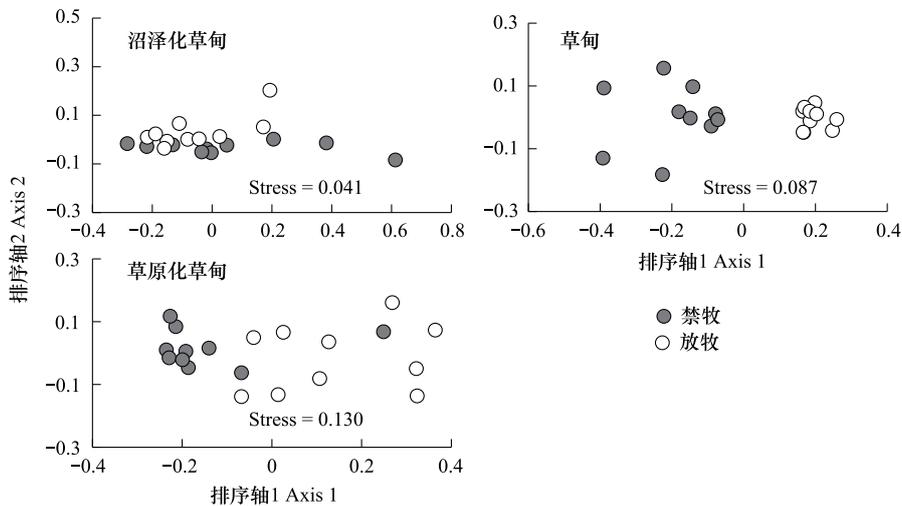


图 2 沼泽化草甸、草甸和草原化草甸禁牧和放牧处理下地表节肢动物群落非度量多维尺度排序 (NMS) 图

Fig.2 Non-metric multidimensional scaling (NMS) plots indicating 2-dimensional distances of ground arthropods at enclosed and grazing treatments of the AMM, AM and ASM

理显著降低了地表节肢动物活动密度,而草原化草甸生境禁牧处理显著提高了地表节肢动物活动密度;草原化草甸生境地表节肢动物物种丰富度显著高于草甸生境,草甸生境地表节肢动物物种丰富度又显著高于沼泽化草甸生境,禁牧处理对 3 种高寒草甸生境地表节肢动物物种丰富度的影响较小(图 3)。高寒草甸生境类型对地表节肢动物多样性和均匀度指数有显著影响,高寒草甸类型和处理的交互均对地表节肢动物多样性和均匀度指数有显著影响,禁牧处理仅对地表节肢动物均匀度指数有显著影响(表 2)。3 种高寒草甸生境地表节肢动物多样性和均匀度指数变化趋势相近,禁牧处理显著提高草甸地表节肢动物多样性和均匀度指数,草原化草甸生境禁牧显著降低地表节肢动物多样性和均匀度指数(图 3)。此外,研究还发现高寒草甸生境地表节肢动物稀有类群活动密度及物种丰富度对禁牧和放牧处理响应不敏感,它们的变化趋势一致在草原化草甸生境最高,而在沼泽化草甸生境最低。

表 2 沼泽化草甸、草甸和草原化草甸禁牧和放牧处理下地表节肢动物群落结构和主要种活动密度的二因素方差分析 (GLM) 结果

Table 2 The results of two-way ANOVAs (GLM) on the community structure and dominant species of ground arthropods at enclosed and grazing treatments of the AMM, AM and ASM

	高寒草甸类型 Habitat types		处理 Treatments		高寒草甸类型×处理	
	$F_{1,60}$	P	$F_{3,60}$	P	$F_{3,60}$	P
群落结构 Community structure						
活动密度 Activity density	2.08	0.136	12.73	<0.001	15.99	<0.001
物种丰富度 Species richness	29.59	<0.001	0.02	0.896	1.57	0.218
多样性指数 Shannon-Wiener index	104.55	<0.001	1.02	0.317	26.4	<0.001
均匀度指数 Evenness index	4.28	0.019	4.05	0.049	13.53	<0.001
主要种 Dominant species						
盲蛛 1 种 <i>Opiliones</i> sp.	45.72	<0.001	26.44	<0.001	8.13	<0.001
豹蛛属 1 种 <i>Pardosa</i> sp.	8.55	<0.001	6.82	0.012	28.91	<0.001
微蛛亚科 1 种 <i>Erigoninae</i> sp.	25.48	<0.001	4.96	0.03	3.48	0.038
螨科 1 种 <i>Pentatomidae</i> sp.	18.94	<0.001	11.86	<0.001	6.12	0.004
小长螨 <i>Nysius ericae</i>	26.43	<0.001	0.41	0.527	7.81	<0.001
锥须步甲 <i>Bembidion</i> sp.1	180.4	<0.001	5.41	0.024	3.74	0.03
心步甲 <i>Nebria orientalis</i>	20.63	<0.001	15.98	<0.001	13.36	<0.001
蜉金龟 <i>Aphodius</i> sp.1	4.07	0.023	3.56	0.064	8.7	<0.001
大蚊科 <i>Tipulidae</i> spp.	1.38	0.261	11.04	0.002	7.12	0.002

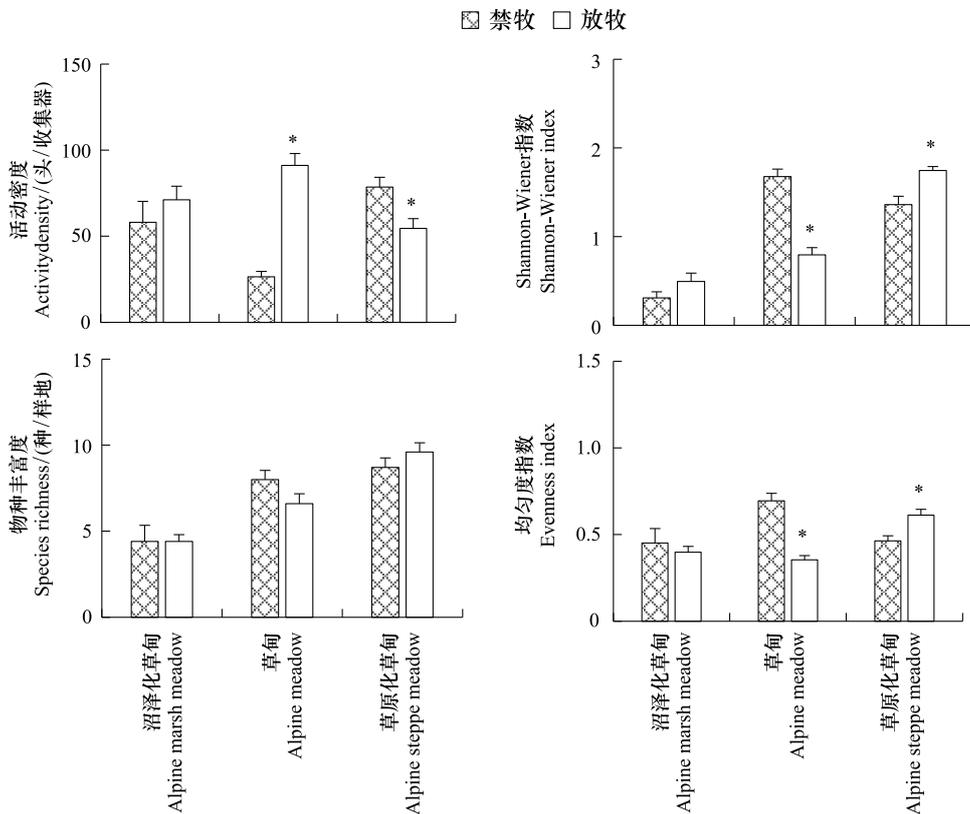


图 3 沼泽化草甸、草甸和草原化草甸生境禁牧和放牧处理下地表节肢动物活动密度、物种丰富度、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数比较

Fig.3 The activity density, species richness, Shannon-Wiener index, and evenness index of ground arthropods at enclosed and grazing treatments of the AMM, AM and ASM

* 代表禁牧和放牧处理下存在显著差异

2.3 围封禁牧对高寒草甸主要地表节肢动物种活动密度的影响

高寒草甸生境类型和处理对地表节肢动物群落结构参数的二因素方差分析结果表明,高寒草甸生境类型对主要地表节肢动物种(除大蚊科幼虫)活动密度均有显著影响(表2)。盲蛛1种、微蛛亚科1种、锥须步甲属种1、蝽科1种和小长蝽种1活动密度变化趋势相近,这5个种在沼泽化草甸生境活动密度显著低于草甸和草原化草甸生境;豹蛛属1种的活动密度变化趋势与盲蛛1种相反,它在沼泽化草甸生境活动密度显著高于草甸和草原化草甸生境;心步甲和蜉金龟种1活动密度的变化趋势一致,它们在草甸生境的活动密度显著高于沼泽化草甸和草原化草甸生境(图4)。高寒草甸禁牧和放牧处理下9种主要的地表节肢动物种活动密度存在一定差异,这种差异又随着高寒草甸生境类型不同而变(表2)。禁牧处理显著降低了草甸生境豹蛛属1种的活动密度,但提高了草原化草甸生境豹蛛属1种的活动密度;小长蝽活动密度变化与豹蛛属1种变化相反;蜉金龟科1种在沼泽化草甸和草甸生境禁牧和放牧处理下活动密度变化与小长蝽相近。禁牧处理还提高了草甸和草原草甸盲蛛科1种的活动密度,草甸生境锥须步甲属1种和心步甲在禁牧处理显著高于放牧处理;放牧处理显著提高了沼泽化草甸和草甸生境大蚊科幼虫活动密度,草原化草甸放牧处理也显著提高了微蛛亚科1种和蝽科1种的活动密度(图4)。

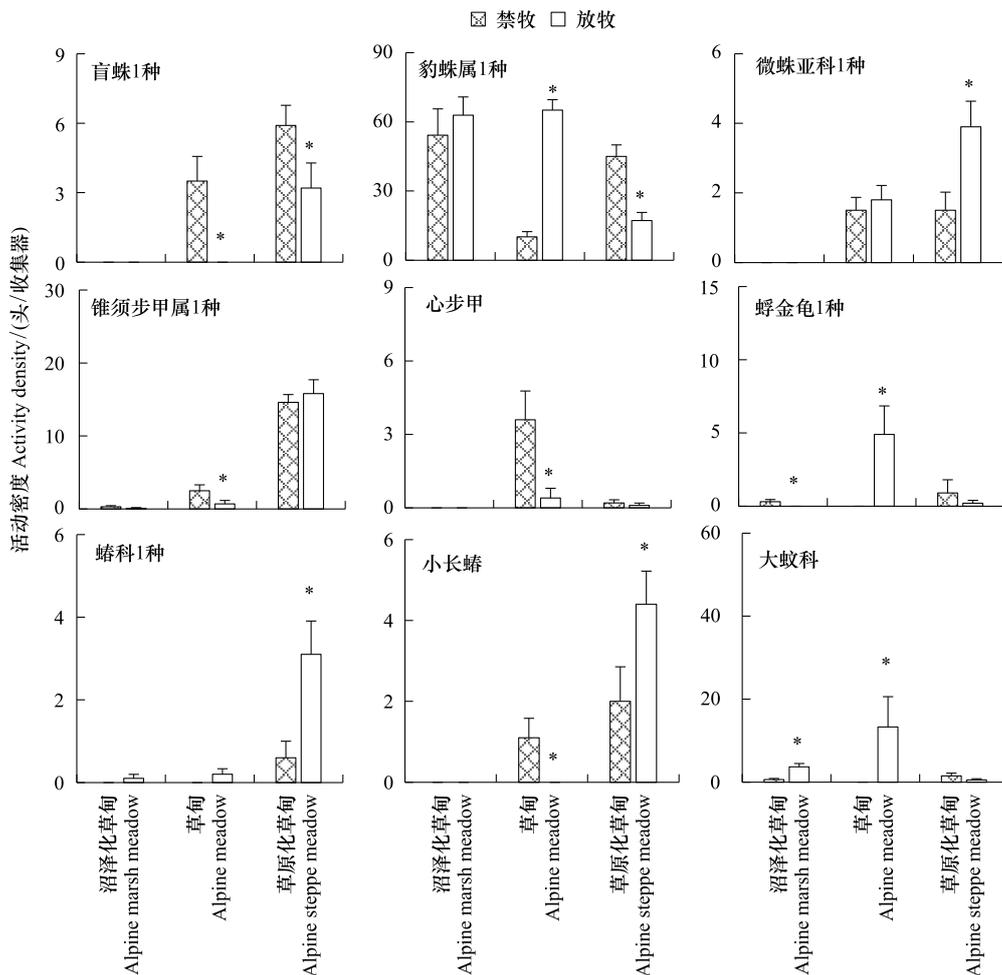


图4 围封和放牧沼泽化草甸、草甸和草原化草甸生境禁牧和放牧处理下主要地表节肢动物种活动密度比较

Fig.4 The activity density of dominant ground arthropod species at enclosed and grazing treatments of the AMM, AM and ASM

2.4 围封禁牧对地表节肢动物种间关系的影响

狼蛛科豹蛛属1种是高寒草甸生态系统重要的捕食者,放牧处理下豹蛛属1种的活动密度与土壤水分呈

显著正相关($r=0.46, P=0.011$),而禁牧处理降低了豹蛛属 1 种活动密度与土壤水分的相关性($r=-0.10, P=0.594$),说明放牧扰动对豹蛛属 1 种的活动密度存在下行控制效应,禁牧降低了表层土壤水分有效性,进而提高了高寒草甸狼蛛科等捕食者对土壤水分的依赖性。沼泽化草甸生境放牧处理下土壤水分和豹蛛属 1 种活动密度呈负相关($r=-0.22, P=0.544$),豹蛛属 1 种与其它土壤动物类群的活动密度和物种丰富度的相关性均较小($r=-0.20, P=0.586; r=0.03, P=0.944$);禁牧处理下土壤水分和豹蛛属 1 种活动密度呈正相关($r=0.60, P=0.067$),豹蛛属 1 种与其它土壤动物类群的活动密度和物种丰富度呈显著正相关($r=0.78, P=0.008; r=0.71, P=0.022$)。草甸和草原化草甸生境禁牧和放牧处理对土壤水分、豹蛛属 1 种和其它地表节肢动物活动密度和物种丰富度之间关系的影响较小。

禁牧和放牧高寒草甸豹蛛属 1 种活动密度与稀有类群活动密度和物种丰富度的相关性较小(表 3)。禁牧处理下主要地表节肢动物种中微蛛亚科 1 种和心步甲与豹蛛属 1 种呈显著负相关,大蚊科与豹蛛属 1 种呈显著正相关;放牧处理下盲蛛 1 种、微蛛亚科 1 种、蜻科 1 种、小长蜻和锥须步甲均与豹蛛属 1 种活动密度呈显著负相关,禁牧处理降低了地表节肢动物中主要种的相互作用强度(表 3)。此外,研究还发现禁牧($r=-0.08, P=0.687; r=-0.44, P=0.015$)与放牧处理($r=-0.67, P<0.001; r=-0.42, P=0.021$)相比降低了盲蛛 1 种、微蛛亚科 1 种与豹蛛属 1 种的相互作用强度,盲蛛 1 种和微蛛亚科 1 种的相互作用强度也相应降低($r=0.39, P=0.033; r=0.48, P=0.007$),这会改变高寒草甸以地表节肢动物为主的碎屑食物网结构及功能。

表 3 禁牧和放牧处理下豹蛛属 1 种活动密度与地表节肢动物群落中稀有种活动密度和物种丰富度及优势种活动密度的关系

Table 3 Relationships of the activity density and species richness in rare ground arthropods, and dominant species at enclosed and grazing treatments with the activity density of *Pardosa* sp.

	禁牧 Enclosed habitats		放牧 Grazing habitats	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
稀有种 Rare species				
活动密度 Activity density	0.23	0.224	-0.21	0.278
物种丰富度 Species richness	0.10	0.591	-0.27	0.153
主要动物类群 Dominant species				
盲蛛 1 种 <i>Opiliones</i> sp.	-0.08	0.687	-0.67	<0.001
微蛛亚科 1 种 <i>Erigoninae</i> sp.	-0.44	0.015	-0.42	0.021
蜻科 1 种 <i>Pentatomidae</i> sp.	0.16	0.409	-0.45	0.013
小长蜻 <i>Nysius ericae</i>	-0.02	0.912	-0.70	<0.001
锥须步甲 <i>Bembidion</i> sp.1	0.11	0.574	-0.68	<0.001
心步甲 <i>Nebria orientalis</i>	-0.62	<0.001	0.07	0.715
蜉金龟 <i>Aphodius</i> sp.1	0.35	0.062	0.11	0.572
大蚊科 <i>Tipulidae</i> spp.	0.64	<0.001	0.32	0.089

3 讨论

高寒草甸生态系统过度放牧已经严重影响地上和地下生态系统过程,而气候变暖引发的冻土退化会加剧高寒草甸生态系统退化过程,威胁地下生态系统的健康与稳定^[8,20,26]。过度放牧引起高寒草甸植被和土壤环境变化,土壤微生物、小型和大型土壤动物群落组成及多样性也随之发生变化^[16,26-29]。高寒草甸土壤动物多样性随着放牧强度的增加先增后降,这与植被变化趋势一致,说明适度的干扰有利于维持高寒草甸的生物多样性^[16,30]。本文研究发现,疏勒河源区沼泽化草甸、草甸和草原化草甸构成的退化梯度,地表节肢动物多样性指数和均匀度指数均随着高寒草甸退化而增加。此外,地表和土栖动物类群对放牧强度的响应不一致并存在明显的地域差异,这说明不同土壤动物类群对植被和土壤环境退化的响应敏感程度不同,而较好的土壤水分条件会降低牲畜践踏对高寒草甸植被生长的抑制作用^[16,19]。四川省西北部高寒草地土壤动物对放牧的响应的研究发现,轻度放牧草甸线虫增加,中度放牧草甸土壤节肢动物增加,而重度放牧草甸地表节肢动物增加,

这说明地表节肢动物对重度放牧的响应更敏感^[16]。青藏高原东部的研究发现,适度放牧可以增加地表节肢动物的数量和丰富度^[31],放牧活动还会增加牦牛粪便和凋落物的分解^[32]。欧洲阿尔卑斯山高寒草地的研究发现,放牧会对 *Nematocera* 有正的影响,而对其它大型土壤动物类群均有负的影响,放牧对营养关系的影响较小^[10]。本文研究也发现,3种高寒草甸退化程度较高的草原草甸围封对地表节肢动物多样性有正的影响,而高寒草甸围封对地表节肢动物多样性有负的影响,退化程度较轻的沼泽化草甸地表节肢动物多样性对围封响应不敏感,这说明高寒草甸退化程度影响了高寒草甸地表节肢动物多样性对禁牧和放牧的响应。由此可见,高寒草甸适度放牧不仅可以维持土壤动物多样性,还会提高土壤动物的功能,依据高寒草甸退化程度管理放牧强度可以提高其生态系统稳定性。此外,高寒草甸放牧还会影响啮齿类动物的活动,高原鼯鼠扰动区土壤温度、紧实度和土壤水分变化会影响大型土壤动物分布及其营养结构,家养食草动物和野生食草动物存在互馈作用影响高寒草地生态系统健康,高寒草地放牧管理还需要关注野生动物的多样性^[33]。豹蛛属 1 种(狼蛛科)是高寒草甸主要的捕食性地表节肢动物种(相对多度为 67.0%),它的活动密度随着高寒草甸的退化而降低,这与高寒草地退化过程中土壤水分有效性降低和植被初级生产力降低有关;豹蛛属 1 种活动密度与盲蛛 1 种、微蛛亚科 1 种、锥须步甲属种 1 和蝽类等地表节肢动物种活动密度变化趋势不同,这也导致地表节肢动物活动密度对高寒草甸退化的响应不敏感。疏勒河源区高寒草甸海拔较高,豹蛛属等捕食性节肢动物比重较高,蚯蚓和蚁科等土壤动物缺失,这与其它区域高寒草甸土壤动物研究结果不同^[7,9-10]。总之,围封和放牧驱动的豹蛛属 1 种的活动密度降低导致了捕食者的下行效应减弱,这会影响高寒草甸碎屑食物网和微小食物网结构及其功能,进而影响高寒草甸凋落物分解和养分循环过程^[14,34]。

围封禁牧是退化草地修复的主要措施之一,高寒草甸围封排除放牧扰动逐步恢复植被和土壤环境,但长期围封禁牧也会导致高寒草甸植物多样性、初级生产力及其生态服务功能降低,适度放牧有利于维持高寒草甸生物多样性及其功能^[30,35-36]。本文在疏勒河源区的高寒草甸的研究也发现,长期围封禁牧(10 a)和自由放牧对沼泽化草甸地表节肢动物群落影响较小;草甸生境禁牧与放牧相比显著降低地表节肢动物活动密度,但显著提高地表节肢动物多样性和均匀度指数;草原化草甸地表节肢动物变化与草甸相反,这与薛会英等^[13,37]在藏北高原对线虫群落对围封和放牧响应的研究结果相近。藏北高寒草甸短期围封(3 年)会降低土壤线虫密度,但提高了线虫的多样性和物种丰富度;短期围封和自由放牧没有明显改变高寒草甸生态系统稳定性,随着围封时间的延长可能会降低高寒草地生态系统的稳定性^[13,37]。高寒草甸退化程度不同对围封禁牧的响应不同,适度放牧有利于维持大型和小型土壤动物多样性及其功能,这与土壤微生物和植被对围封及放牧的响应研究结果一致,适度放牧有利于维持高寒草甸生态系统的健康与稳定^[14,18,35,38]。

土壤水分是高寒草甸初级生产力的重要限制因子,高寒草甸退化土壤水分有效性也随之降低,它决定地表节肢动物多样性及关键种对围封和放牧的响应模式及强度^[39-40]。一项关于高寒草甸地下水位控制的实验发现,不同小型土壤动物类群对实验处理的响应不同,螨类对地下水位下降处理的响应不敏感,跳虫和线虫数量对地下水位下降处理存在正响应,这也表明高寒草甸跳虫和线虫数量随着表层土壤水分降低而增加^[41]。本文研究也发现,沼泽化草甸土壤水分较高,地表节肢动物对围封和放牧的响应不敏感,草甸和草原化草甸土壤水分条件较低,地表节肢动物多样性对围封和放牧的响应较敏感。围封禁牧与自由放牧还强烈影响疏勒河源区高寒草甸豹蛛属 1 种的活动密度与土壤水分的关系,它在草甸和草原化草甸生境对禁牧和放牧的响应模式不同,进而影响了高寒草甸地表节肢动物多样性变化规律。围封禁牧降低了豹蛛属 1 种的活动密度与土壤水分的关系,它与其它地表节肢动物的相关性也较弱;放牧条件下豹蛛属 1 种的活动密度与土壤水分呈显著正相关,它对其它地表节肢动物的相关性也较强,这也说明围封和放牧改变土壤水分有效性影响捕食者的下行控制效应,进而影响地表节肢动物种间作用关系和土壤食物网结构及其功能^[14,34,42]。草原化草甸围封显著提高了豹蛛属 1 种的活动密度,它的下行控制效应增强有利于恢复土壤动物多样性,促进退化高寒草甸恢复^[34]。

4 结论

疏勒河源区高寒草甸长期围封会导致地表节肢动物多样性降低,但这种影响会因季节和生境条件变化而异。沼泽化草甸禁牧和放牧处理下地表节肢动物群落组成相差较小,地表节肢动物的平均相异性为 38.8%,禁牧降低了沼泽化草甸地表节肢动物的物种丰富度;草甸和草原化草甸禁牧和放牧处理下地表节肢动物群落组成存在显著差异,地表节肢动物的平均相异性为 79.3%和 46.8%,禁牧提高了其地表节肢动物的物种丰富度。草甸禁牧处理下地表节肢动物活动密度显著降低,而多样性和均匀度指数则显著提高,草原化草甸禁牧和放牧处理下地表节肢动物活动密度、多样性和均匀度指数变化与草甸生境相反。

盲蛛 1 种、豹蛛属 1 种、微蛛亚科 1 种、锥须步甲属种 1、心步甲、蜉金龟种 1、蜻科 1 种、小长蜻和大蚊科幼虫是高寒草甸主要的地表节肢动物种,高寒草甸禁牧会降低微蛛亚科 1 种、蜻科 1 种和大蚊科幼虫的活动密度,但提高了盲蛛 1 种、心步甲和锥须步甲 1 种的活动密度。豹蛛属 1 种、蜉金龟 1 种和小长蜻的活动密度对禁牧的响应因生境不同而异,如草甸禁牧显著降低了豹蛛属 1 种的活动密度,而草原化草甸禁牧则显著提高了豹蛛属 1 种的活动密度。禁牧还改变了高寒草甸地表节肢动物的种间作用关系,这与土壤水分等生境条件变化有关。围封禁牧降低高寒草甸豹蛛属 1 种活动密度与土壤水分的相关性,而豹蛛属 1 种对其它地表节肢动物的捕食强度也随之降低。

参考文献 (References):

- [1] 陈生云,刘文杰,叶柏生,杨国靖,宜树华,王发刚,秦翔,任贾文,秦大河. 疏勒河上游地区植被物种多样性和生物量及其与环境因子的关系. 草业学报, 2011, 20(3): 70-83.
- [2] Ren Y J, Lü Y, Fu B J. Quantifying the impacts of grassland restoration on biodiversity and ecosystem services in China: a meta-analysis. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 542-550.
- [3] Wu M H, Chen S Y, Chen J W, Xue K, Chen S L, Wang X M, Chen T, Kang S C, Rui J P, Thies J E, Bardgett R D, Wang Y F. Reduced microbial stability in the active layer is associated with carbon loss under alpine permafrost degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118 (25): e2025321118.
- [4] 吴明辉,瞿德业,李婷,刘放,高雅月,陈生云,陈拓. 祁连山疏勒河源区冻土退化对土壤微生物生物量碳氮的影响. 地理科学, 2021, 41(1): 177-186.
- [5] 陈生云,赵林,秦大河,岳广阳,任贾文,李元寿,赵拥华. 青藏高原多年冻土区高寒草地生物量与环境因子关系的初步分析. 冰川冻土, 2010, 32(2): 405-413.
- [6] 刘放,吴明辉,魏培洁,贾映兰,陈生云. 疏勒河源高寒草甸土壤微生物生物量碳氮变化特征. 生态学报, 2020, 40(18): 6416-6426.
- [7] 林恭华,杨传华,陈生云,刘文杰,陈桂琛,张同作. 疏勒河上游冻土区大型土壤动物群落调查. 草业科学, 2011, 28(10): 1864-1868.
- [8] 刘安榕,杨腾,徐炜,上官子健,王金洲,刘慧颖,时玉,褚海燕,贺金生. 青藏高原高寒草地地下生物多样性: 进展、问题与展望. 生物多样性, 2018, 26(9): 972-987.
- [9] 尹文英. 中国土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [10] Steinwandter M, Rief A, Scheu S, Traugott M, Seebler J. Structural and functional characteristics of high alpine soil macro-invertebrate communities. *European Journal of Soil Biology*, 2018, 86: 72-80.
- [11] Wei X, Wu P F. Responses of soil insect communities to alpine wetland degradation on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *European Journal of Soil Biology*, 2021, 103: 103276.
- [12] Yin R, Qin W K, Zhao H Y, Wang X D, Cao G M, Zhu B. Climate warming in an alpine meadow: differential responses of soil faunal vs. microbial effects on litter decomposition. *Biology and Fertility of Soils*, 2022, 58(4): 509-514.
- [13] 薛会英,罗大庆,王鸿源,屈兴乐. 藏北高寒草甸土壤线虫群落对围封及自由放牧的响应. 土壤学报, 2017, 54(2): 480-492.
- [14] Wan B B, Mei X M, Hu Z K, Guo H, Chen X Y, Griffiths B S, Liu M Q. Moderate grazing increases the structural complexity of soil micro-food webs by promoting root quantity and quality in a Tibetan alpine meadow. *Applied Soil Ecology*, 2021, 168: 104161.
- [15] 马金豪,吴鹏飞. 土壤动物群落对沙化高寒草地生态恢复的响应. 生态学杂志, 2018, 37(12): 3566-3575.
- [16] 武崎,吴鹏飞,王群,文勇立,高艳美,张荣芝,龙伟. 放牧强度对高寒草地不同类群土壤动物的群落结构和多样性的影响. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1826-1834.
- [17] Chen L T, Jiang L, Jing X, Wang J L, Shi Y, Chu H Y, He J S. Above-and belowground biodiversity jointly drive ecosystem stability in natural

- alpine grasslands on the Tibetan Plateau. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, 30(7): 1418-1429.
- [18] Yin Y L, Wang Y Q, Li S X, Liu Y, Zhao W, Ma Y S, Bao G S. Soil microbial character response to plant community variation after grazing prohibition for 10 years in a Qinghai-Tibetan alpine meadow. *Plant and Soil*, 2021, 458(1): 175-189.
- [19] 潘涛涛, 吴玉宝, 徐长林, 肖红, 柴锦隆, 鱼小军. 模拟条件下藏羊、牦牛践踏和降水对东祁连山高寒草甸地上植被生长的影响. *草原与草坪*, 2019, 39(1): 60-68.
- [20] 任世龙, 宜树华, 陈建军, 秦彧. 高山草地植被盖度对气候变暖和人类活动的响应. *草业科学*, 2013, 30(4): 506-514.
- [21] 郑乐怡, 归鸿. *昆虫分类*. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.
- [22] Song D, Zhu M, Chen J. *The spiders of China*. Shijiazhuang: Hebei science and technology publishing house. 640 pp. 1999.
- [23] 任国栋, 于有志. *中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫*. 保定: 河北大学出版社, 1999.
- [24] 梁宏斌, 虞佩玉. 中国捕食粘虫的步甲种类检索. *昆虫天敌*, 2000, 22(4): 160-167.
- [25] Clarke K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 1993, 18(1): 117-143.
- [26] Wei X, Wu P F. Responses of soil insect communities to alpine wetland degradation on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *European Journal of Soil Biology*, 2021, 103: 103276.
- [27] 张洪芝, 吴鹏飞, 崔丽巍. 高寒草甸大型土壤动物群落结构特征及其与环境的关系. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1267-1273.
- [28] 龙伟, 高艳美, 吴鹏飞. 若尔盖高寒草甸退化对表栖节肢动物群落的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 128-138.
- [29] 李军豪, 杨国靖, 王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2109-2118.
- [30] 潘庆民, 孙佳美, 杨元合, 刘伟, 李昂, 彭云峰, 薛建国, 夏昊, 黄建辉. 我国草原恢复与保护的问题与对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(6): 666-674.
- [31] Wang X Y, He X C, Price M, He Q Y, Zhang P, Ran J H, Wu Y J. Epigeic arthropod community changes in response to livestock-caused alpine grassland degradation on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 35: e02062.
- [32] Yang C T, Zhang Y, Hou F J, Millner J P, Wang Z F, Chang S H. Grazing activity increases decomposition of yak dung and litter in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. *Plant and Soil*, 2019, 444(1): 239-250.
- [33] 叶国辉, 楚彬, 胡桂馨, 张飞宇, 华铄泽, 周富斐, 花立民. 高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物多样性对环境因子的响应. *生态学报*, 2021, 41(2): 792-802.
- [34] Koltz A M, Classen A T, Wright J P. Warming reverses top-down effects of predators on belowground ecosystem function in Arctic tundra. *PNAS*, 2018, 115(32): 7541-7549.
- [35] 姚喜喜, 才华, 李长慧. 封育和放牧对高寒草甸植被群落特征和土壤特性的影响. *草地学报*, 2021, 29(S1): 128-136.
- [36] 刘晓琴, 张翔, 张立锋, 李英年, 赵亮, 徐世晓, 李红琴, 马荣荣, 牛犇, 高玉葆, 古松. 封育年限对高寒草甸群落组分和物种多样性的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5150-5162.
- [37] 薛会英, 罗大庆, 王鸿源, 屈兴乐. 藏北高寒草甸土壤线虫群落对围封及自由放牧的响应. *土壤学报*, 2017, 54(2): 480-492.
- [38] Du Y G, Ke X, Dai L C, Cao G M, Zhou H K, Guo X W. Moderate grazing increased alpine meadow soils bacterial abundance and diversity index on the Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(16): 8681-8687.
- [39] 徐锰瑶, 李雪华, 刘思洋, 蒋绍妍, 王笑影. 围封和水氮添加对重度退化草地植物多样性的影响. *生态环境学报*, 2020, 29(9): 1730-1737.
- [40] 岳东霞, 牟鑫亮, 周妍妍, 郭晓娟, 魏乐民, 郭建军. 疏勒河流域净初级生产力与土壤含水量耦合关系研究. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2021, 57(4): 518-527, 536.
- [41] Wei X, Cao R, Wu X W, Eisenhauer N, Sun S C. Effect of water table decline on the abundances of soil mites, springtails, and nematodes in the Zoige peatland of eastern Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, 2018, 129: 77-83.
- [42] Laws A N, Joern A. Predator-prey interactions are context dependent in a grassland plant-grasshopper-wolf spider food chain. *Environmental Entomology*, 2015, 44(3): 519-528.